

Формы изолированных доменов в одноосных сегнетоэлектриках

В.Я. Шур, А.Р. Ахматханов, А.А. Есин, М.А. Чувакова
М.С. Кособоков, Е.В. Пелегова

*Институт естественных наук и математики, Уральский федеральный университет, 620000
Екатеринбург, Россия
e-mail: vladimir.shur@urfu.ru*

В работе систематически рассмотрены и классифицированы формы изолированных доменов в одноосных сегнетоэлектриках, а также на примере монокристаллов семейства ниобата лития LiNbO_3 (LN) и танталата лития LiTaO_3 (LT) с симметрией C_{3v} представлены условия образования доменов различных форм при переключении поляризации в однородном поле. Полученные экспериментальные результаты объяснены в рамках единого кинетического подхода, который базируется на аналогии между кинетикой сегнетоэлектрических доменов и ростом кристаллов. Особое внимание уделено особенностям роста доменов в сильно неравновесных условиях переключения, вызванных запаздыванием экранирования деполяризующего поля.

Статическая доменная структура на поверхности визуализировалась с помощью оптической микроскопии, сканирующей электронной микроскопии и силовой микроскопии пьезоэлектрического отклика (piezoelectric force microscopy), а домены в объеме – с использованием конфокальной микроскопии комбинационного рассеяния (confocal Raman microscopy) и генерации второй гармоники (Cherenkov-type second harmonic generation) [1]. Изменение формы доменов при переключении поляризации изучалось с помощью регистрации последовательности мгновенных оптических изображений с разрешением по времени до 10 мкс. Для создания сильнонеравновесных условий переключения на полярных гранях пластин наносились диэлектрические слои [2] и производилось переключение пьезоэлектрическим полем, возникающим при импульсном облучении ИК лазером [3, 4].

Классическое теоретическое рассмотрение объясняет формирование равновесных изолированных доменов в форме выпуклых равносторонних многоугольников: шестиугольников для LN и треугольников для LT. Вместе с тем экспериментально наблюдаются разнообразные формы доменов: лучи, звезды, выпуклые и вогнутые неправильные многоугольники, круглые домены и даже дендриты [5-8].

В рамках кинетического подхода рост доменов рассматривается как результат генерации элементарных ступеней (пары кинков) на доменной стенке и движения кинков вдоль стенки [7]. Скорости движения кинков и генерации ступеней определяются величиной превышения над порогом локального значения суммы внешнего поля, создаваемого приложенным напряжением, и остаточного деполяризующего поля (residual depolarization field), создаваемого связанными зарядами и частично скомпенсированного быстрым внешним экранированием [9]. Запаздывание объемного экранирования приводит к качественному изменению формы изолированных доменов и проявлению эффектов самоорганизации при формировании самоподобных микро- и нанодоменных структур. Особенности формы доменов при сильно неравновесных условиях переключения (highly nonequilibrium switching conditions) продемонстрированы экспериментально и с помощью компьютерного моделирования. Рассмотрено два типа генерации ступеней: (а) стохастическое с равновероятным положением центров зародышеобразования и (б) детерминированное с генерацией ступеней на вершинах доменов в форме многоугольников и анизотропным движением кинков. Стохастическое зародышеобразование, рассмотренное в классическом подходе [10], приводит к образованию круглых доменов, а детерминированное – стимулирует образование доменов в форме многоугольников с плоскими стенками. При запаздывании экранирования образуются неправильные многоугольники и звезды.

Экспериментально изучен эффект стабильности формы (domain shape stability), представляющий собой быстрое восстановление формы шестиугольных доменов после слияния и показано, что он обусловлен образованием короткоживущих сверхбыстрых доменных стенок с аномальным отклонением от основной кристаллографической оси [11, 12].

При анализе полученных результатов использовался кинетический подход [9]. При таком рассмотрении решающую роль играет остаточное деполяризующее поле, обусловленное запаздыванием объемного экранирования. Образование шлейфа остаточного деполяризующего поля за движущейся доменной стенкой приводит к замедлению традиционного роста доменов за счет бокового движения доменных стенок. Сильнонеравновесные условия переключения приводят к качественному изменению формы изолированных доменов и проявлению эффектов самоорганизации при формировании самоподобных микро- и нанодоменных структур [2, 3]. Для теоретического описания эффектов потери устойчивости формы и эволюции доменной структуры проведен оригинальный расчет кинетики доменной структуры. Предложенный подход впервые использован для моделирования топологической неустойчивости формы плоской доменной стенки и изменения размерности формы доменов при сильнонеравновесных условиях переключения поляризации [3, 4].

Полученные результаты представляют значительный интерес для развития методов доменной инженерии и инженерии доменных стенок, которые широко используются для создания преобразователей частоты лазерного излучения и пьезоэлектрических устройств с рекордными характеристиками [13, 14].

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (проект №18-29-20077-мк). Использовано оборудование Уральского центра коллективного пользования «Современные нанотехнологии» Уральского федерального университета.

1. V.Ya. Shur, P.S. Zelenovskiy, *J. Appl. Phys.* **116**, 066802 (2014).
2. V.Ya. Shur, A.R. Akhmatkhanov, M.A. Chuvakova, M.A. Dolbilov, P.S. Zelenovskiy, A.I. Lobov, *J. Appl. Phys.* **121**, 104101 (2017).
3. V.Ya. Shur, E.A. Mingaliev, M.S. Kosobokov, M.S. Nebogatikov, A.I. Lobov, A.V. Makaev, *J. Appl. Phys.* **127**, 094103 (2020).
4. V.Ya. Shur, M.S. Kosobokov, A.V. Makaev, D.K. Kuznetsov, M.S. Nebogatikov, D.S. Chezganov, E.A. Mingaliev, *Acta Materialia* in press (2021).
5. V.Ya. Shur, A.R. Akhmatkhanov, *Phil. Trans. R. Soc. A.* **376**, 20170204 (2018).
6. V.Ya. Shur, M.S. Kosobokov, E.A. Mingaliev, D.K. Kuznetsov, P.S. Zelenovskiy, *J. Appl. Phys.* **119**, 144101 (2016).
7. V.Ya. Shur, E.V. Pelegova, M.S. Kosobokov, *Ferroelectrics* **569**, 251 (2020).
8. V.Ya. Shur, D.S. Chezganov, M.S. Nebogatikov, I.S. Baturin, M.M. Neradovskiy, *J. Appl. Phys.* **112**, 104113 (2012).
9. V.Ya. Shur, *J. Mater. Sci.* **41**, 199 (2006).
10. R.C. Miller, G. Weinreich, *Phys. Rev.* **117**, 1460 (1960).
11. A.A. Esin, A.R. Akhmatkhanov, V.Ya. Shur, *Appl. Phys. Lett.* **114**, 192902 (2019).
12. A.R. Akhmatkhanov, I.A. Kipenko, A.A. Esin, V.Ya. Shur, *Appl. Phys. Lett.* **117**, 022903 (2020).
13. V.Ya. Shur, *Ferroelectrics* **340**, 3 (2006).
14. V.Ya. Shur, A.R. Akhmatkhanov, I.S. Baturin, *Appl. Phys. Rev.* **2**, 040604 (2015).